

บทที่ 3

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

3.1 การวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสาร แบบแยกธาตุ และค่าความร้อนของฟางข้าว

ผลการวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสาร แบบแยกธาตุ และค่าความร้อนของฟางข้าวที่มีขนาดอนุภาคน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.25 มิลลิเมตรแสดงในตาราง 3.1

ตาราง 3.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสาร แบบแยกธาตุ และค่าความร้อนของฟางข้าว

		ผลการวิเคราะห์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
การวิเคราะห์แบบประมาณ	ความชื้น	9.26
	สารระเหยได้	74.59
	เถ้า	8.91
	คาร์บอนคงตัว	7.24
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ	คาร์บอน	40.18
	ไฮโดรเจน	6.37
	ไนโตรเจน	1.16
	ซัลเฟอร์	0.32
	ออกซิเจน (ผลต่าง)	52.29
ค่าความร้อน (แคลอรีต่อกรัม)		3,929.56

* หมายเหตุ ฐานการวิเคราะห์เป็นแบบ *as received*

หมายเหตุ ผลการทดลองทั้งหมดที่นำเสนอในงานวิจัย เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองหลายครั้ง
(3-4 ครั้ง)

จากการวิเคราะห์แบบประมาณของฟางข้าว พบว่ามีปริมาณสารระเหยได้มากที่สุด คือ ร้อยละ 74.59 และมีปริมาณคาร์บอนคงตัวน้อยที่สุด คือ ร้อยละ 7.24 จากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ พบว่ามีปริมาณคาร์บอน และออกซิเจนปริมาณที่ค่อนข้างสูง คือ ร้อยละ 40.18 และ 52.29 ตามลำดับ และมีปริมาณไฮโดรเจนร้อยละ 6.37 ซึ่งจากผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุนี้ ทำให้ทราบว่าฟางข้าวสามารถเปลี่ยนไปเป็นเอทานอลได้ด้วยกระบวนการที่เหมาะสม โดยผ่านกระบวนการปรับสภาพ และกระบวนการหมัก เนื่องจากเอทานอลมีคาร์บอน ออกซิเจน และไฮโดรเจนประกอบกันเป็น โมเลกุล (C_2H_5OH) และเมื่อพิจารณาจากค่าความร้อนของฟางข้าว พบว่าฟางข้าวมีค่าความร้อนที่ไม่สูง คือ 3,929.56 แคลอรีต่อกรัม จึงควรนำฟางข้าวไปเพิ่มมูลค่าโดยผลิตเป็นเอทานอล เนื่องจากเอทานอลมีค่าพลังงานที่สูงกว่า คือ 7,091.56⁽³⁶⁾ แคลอรีต่อกรัม

3.2 องค์ประกอบทางเคมีและสัณฐานวิทยาของฟางข้าวก่อนและหลังทำการปรับสภาพ

3.2.1 การปรับสภาพฟางข้าวด้วยไอน้ำ

การปรับสภาพฟางข้าวด้วยไอน้ำทำในเครื่องปรับสภาพ ดังรูป 2.5 เนื่องจากเครื่องมือนี้เป็นระบบปิด ในการปรับสภาพฟางข้าวด้วยไอน้ำแต่ละสภาวะจึงใช้ปริมาณน้ำในการปรับสภาพคงที่ คือ 543.02 ลิตร การคำนวณปริมาณน้ำที่ใช้แสดงในภาคผนวก ข

ตาราง 3.2 องค์ประกอบทางเคมีของฟางข้าวก่อนและหลังปรับสภาพด้วยไอน้ำ

สภาวะ	ลิกนิน (ร้อยละ)	เซลลูโลส (ร้อยละ)	เฮมิเซลลูโลส (ร้อยละ)
ก่อนปรับสภาพ	21.97	57.30	25.11
หลังปรับสภาพด้วยไอน้ำ 2 ชั่วโมง	21.07	56.40	22.06
หลังปรับสภาพด้วยไอน้ำ 4 ชั่วโมง	22.78	55.93	23.93
หลังปรับสภาพด้วยไอน้ำ 6 ชั่วโมง	25.10	53.58	21.78

จากผลการทดลอง องค์ประกอบทางเคมีของฟางข้าวก่อนปรับสภาพ พบว่ามีลิกนินร้อยละ 21.97 โดยน้ำหนัก เซลลูโลสร้อยละ 57.30 โดยน้ำหนัก และเฮมิเซลลูโลสร้อยละ 25.11 โดยน้ำหนัก หลังจากปรับสภาพฟางข้าวด้วยไอน้ำที่ความดันประมาณ 1-2 บาร์ อุณหภูมิประมาณ

100-130 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าปริมาณองค์ประกอบทางเคมีลดลงเหลือลิกนิน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสร้อยละ 21.07, 56.40 และ 22.06 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เมื่อเพิ่มเวลาในการปรับสภาพเป็น 4 และ 6 ชั่วโมง พบว่าปริมาณเซลลูโลส ลดลงเหลือร้อยละ 55.93 และ 53.58 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เฮมิเซลลูโลสลดลงเช่นกันเหลือร้อยละ 23.93 และ 21.78 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ แต่ปริมาณของลิกนินเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 22.78 และ 25.10 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ทำให้ทราบว่าปริมาณลิกนินที่วิเคราะห์ได้ ประกอบด้วยส่วนที่มีโครงสร้างคล้ายลิกนิน (Lignin-Like Structures) หรือ ลิกนินเทียม (Pseudo-Lignin) ซึ่งเกิดจากการควบแน่นซ้ำระหว่างการปรับสภาพด้วยไอน้ำของน้ำตาลหรือน้ำตาลที่เสื่อมสภาพ และสารแทรกตัวอื่นๆ (Extractives)^(37,38,39) จึงทำให้ปริมาณลิกนินเพิ่มขึ้น เมื่อใช้เวลาในการปรับสภาพด้วยไอน้ำเพิ่มขึ้น

การตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของฟางข้าว โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ก้ำดั่งขยาย 15 kv เท่ากัน ภาพสัณฐานวิทยาของฟางข้าวทั้งก่อนและหลังปรับสภาพด้วยไอน้ำเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง แสดงดังรูป 3.1, 3.2, 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ จะเห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่น่าสนใจเกิดขึ้น ซึ่งก่อนการปรับสภาพ (รูป 3.1) พื้นผิวมีความละเอียดและเรียงตัวกันแน่น เมื่อปรับสภาพแล้ว เส้นใยเกิดการบิดรูป นอกจากนั้น เส้นใยยังเกิดการแบ่งแยกและเปิดตัวออกจากโครงสร้าง จึงเป็นการเพิ่มพื้นผิวภายนอกที่เกิดจากการแตกหักจากการระบิดด้วยไอน้ำให้กับฟางข้าว อีกนัยหนึ่ง อาจเป็นการทำให้ไอน้ำแทรกตัวไปควบแน่นซ้ำกับน้ำตาลหรือน้ำตาลที่เสื่อมสภาพ หรือสารแทรกตัวระหว่างการปรับสภาพ ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดลิกนินเทียมขึ้นได้ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้เพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้มากขึ้นในการปรับสภาพดังรูป 3.2-3.4

ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Nguyen⁽³⁷⁾ และคณะ Cara⁽³⁸⁾ และคณะ และ Negro⁽³⁹⁾ และคณะ ซึ่งผลการทดลองในการปรับสภาพชีวมวลด้วยไอน้ำ และมีการเกิดลิกนินเทียมขึ้นของทั้งสามงานวิจัยนี้แสดงดังตาราง 3.3

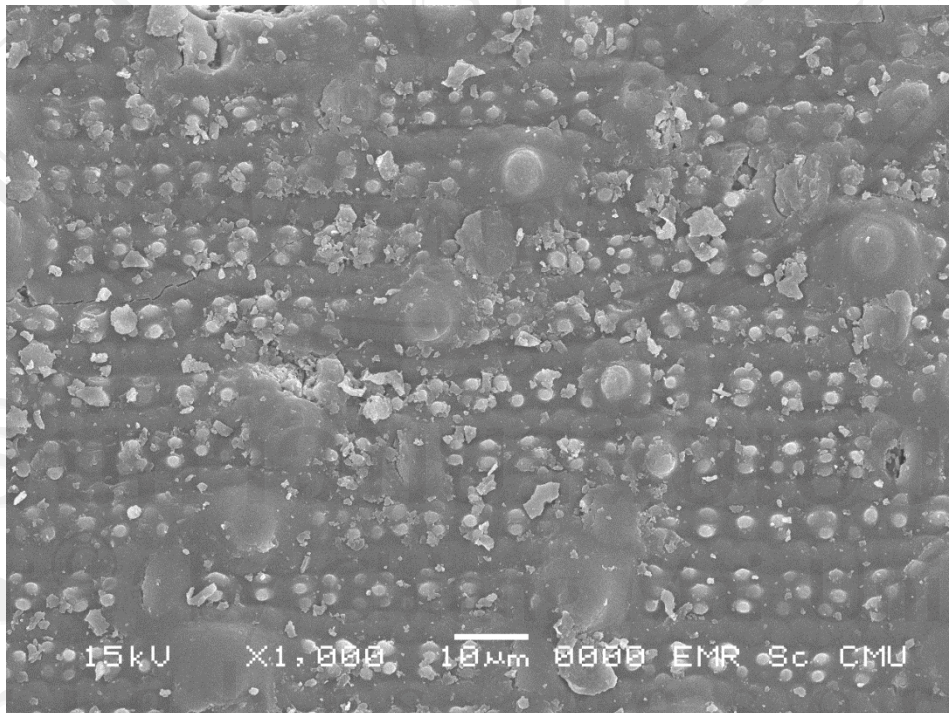
ตาราง 3.3 เปรียบเทียบสภาวะการปรับสภาพชีวมวลด้วยไอน้ำ

งานวิจัย	ชนิดชีวมวล	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (min)	ร้อยละลิกนินที่เพิ่มขึ้น
Nguyen และคณะ	ไม้เนื้ออ่อน (ตระกูลสน)	180-220	5	135
Cara และคณะ	ต้นมะกอก	230	10	70.30

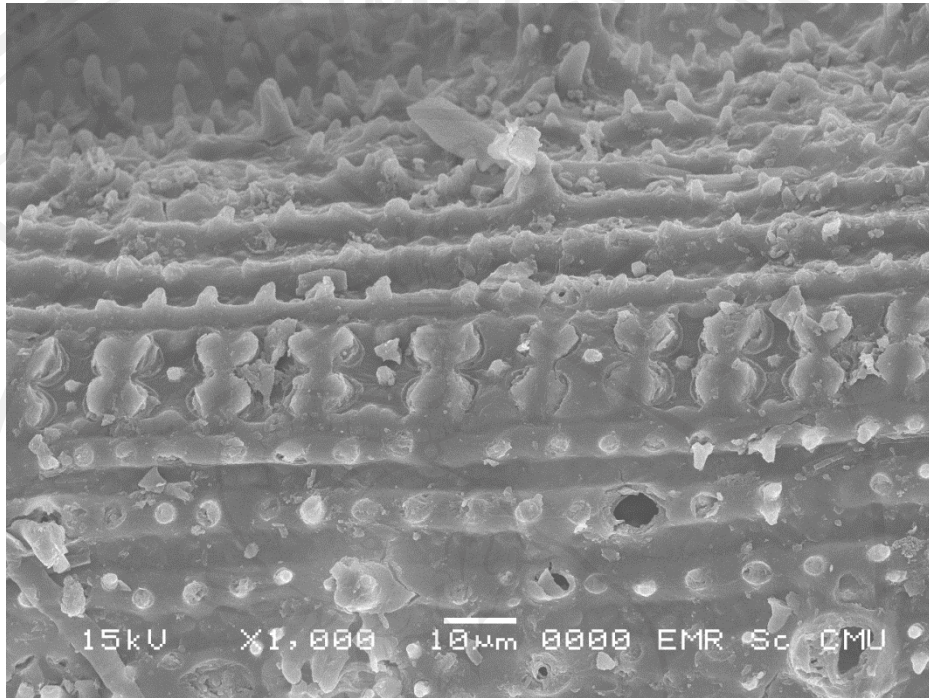
ตาราง 3.3 เปรียบเทียบสภาวะการปรับสภาพชีวมวลด้วยไอน้ำ (ต่อ)

งานวิจัย	ชนิดชีวมวล	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (min)	ร้อยละลิกนินที่เพิ่มขึ้น
Negro และคณะ	สนกลุ่ม <i>Pinus pinaster</i>	210	4	39.36
งานวิจัยนี้	ฟางข้าว	100-130	360	12.47

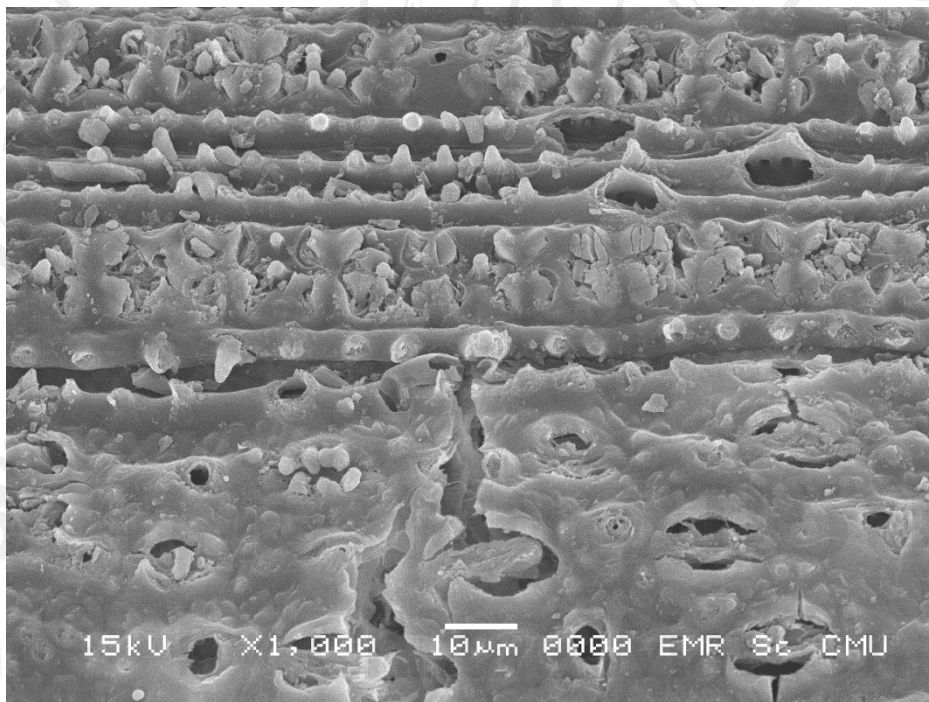
จากตาราง 3.3 ปริมาณลิกนินที่เพิ่มขึ้นจากการปรับสภาพชีวมวลชนิดต่างๆด้วยไอน้ำ ปริมาณลิกนินที่เพิ่มขึ้นอาจขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล เนื่องจากชีวมวลแต่ละชนิดมีโครงสร้างที่ต่างกัน ทำให้เกิดลิกนินเทียมในปริมาณที่ต่างกันด้วย จากงานวิจัยของ Nguyen และคณะ และ Negro และคณะ ใช้ชีวมวลประเภทสนเช่นเดียวกัน แต่ต่างกันที่พันธุ์ของสน เมื่อทำการปรับสภาพด้วยไอน้ำที่สภาวะใกล้เคียงกัน แต่ปริมาณลิกนินที่เพิ่มขึ้นแตกต่างกันมากคือร้อยละ 135 และ 39.36 ตามลำดับ



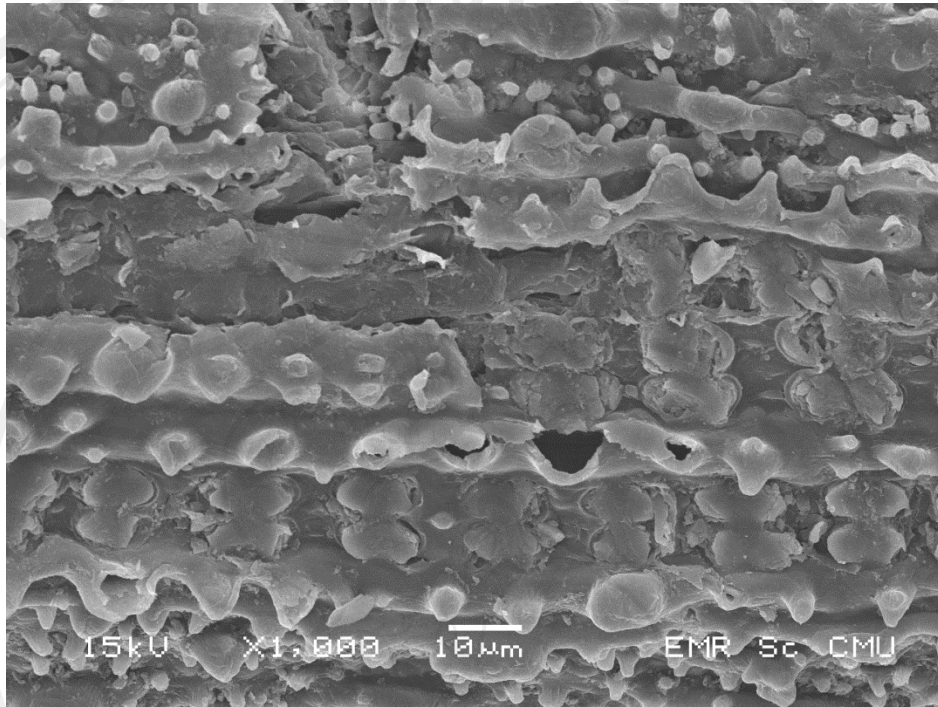
รูป 3.1 สัณฐานวิทยาของฟางข้าวก่อนปรับสภาพ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูป 3.2 สัณฐานวิทยาของฟางข้าวหลังปรับสภาพด้วยไอน้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูป 3.3 สัณฐานวิทยาของฟางข้าวหลังปรับสภาพด้วยไอน้ำเป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูป 3.4 สัณฐานวิทยาของฟางข้าวหลังปรับสภาพด้วยไอน้ำเป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.2.2 การปรับสภาพฟางข้าวด้วยไอน้ำ และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

จากการเกิดลิกนินเทียมผู้วิจัยจึงสนใจการนำฟางข้าวที่ปรับสภาพด้วยไอน้ำมาปรับสภาพต่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 %wt/v ที่อุณหภูมิประมาณ 75-90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลการปรับสภาพแสดงในตาราง 3.4

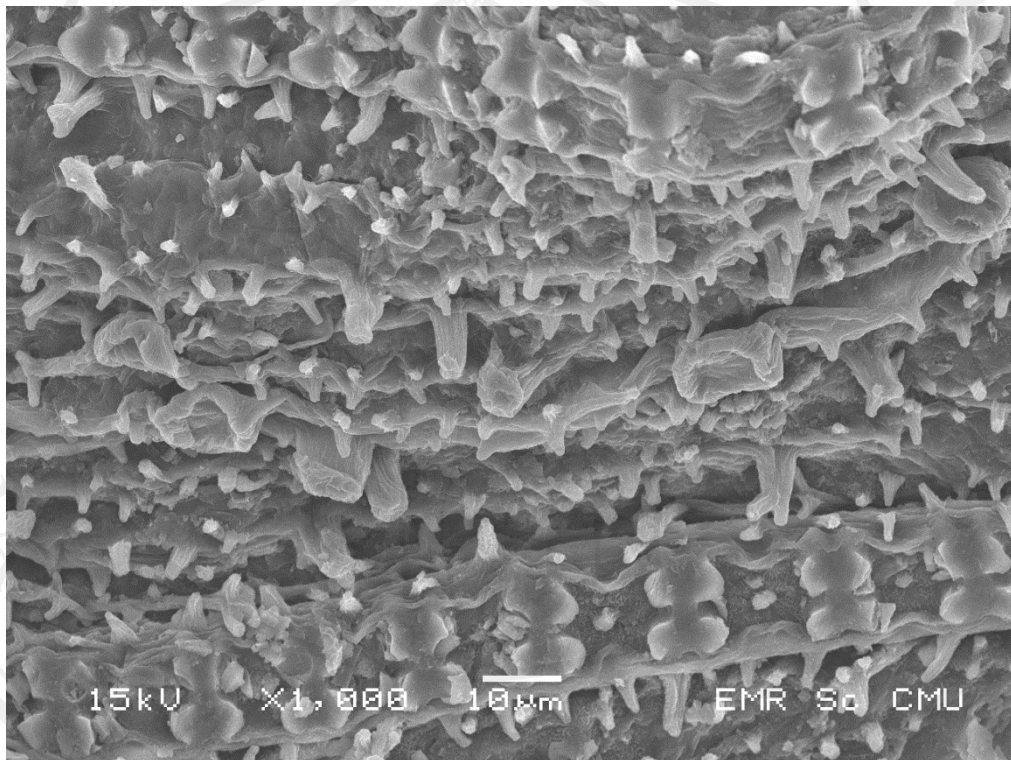
ตาราง 3.4 องค์ประกอบทางเคมีของฟางข้าวก่อนและหลังปรับสภาพด้วยไอน้ำและสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2 %wt/v

สถานะ	ลิกนิน (ร้อยละ)	เซลลูโลส (ร้อยละ)	เฮมิเซลลูโลส (ร้อยละ)
ไอน้ำ 2 ชั่วโมงและสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 %wt/v	11.55	53.95	19.75
ไอน้ำ 4 ชั่วโมงและสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 %wt/v	16.07	50.28	18.64
ไอน้ำ 6 ชั่วโมงและสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 %wt/v	20.66	48.76	16.13

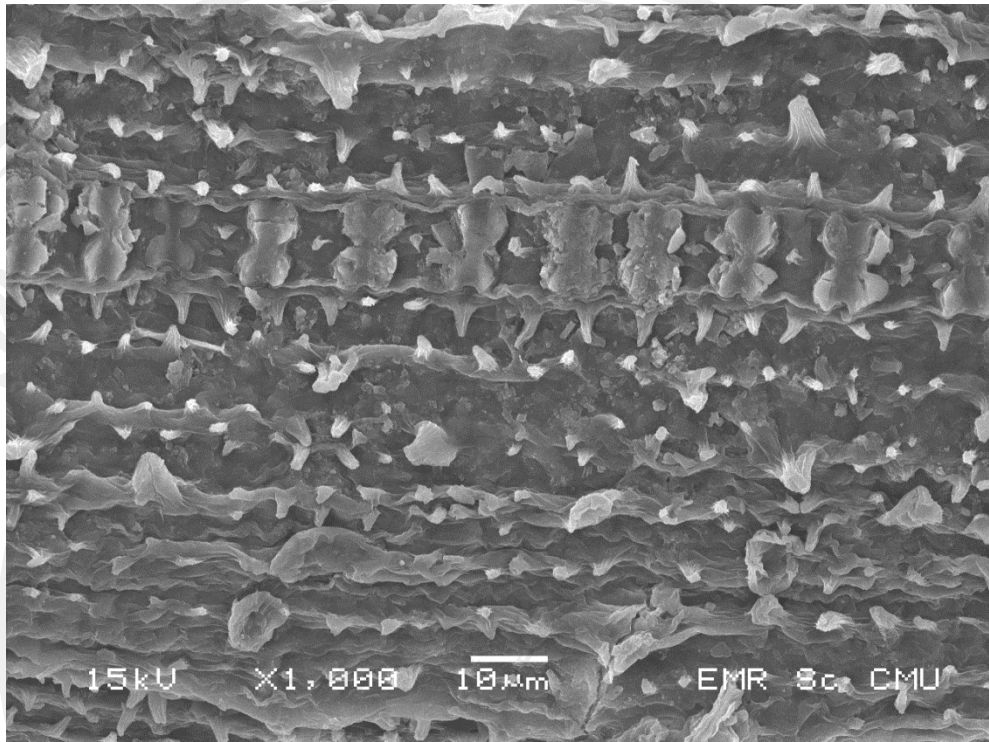
เมื่อนำฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยไอน้ำมาปรับสภาพต่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 %wt/v ที่อุณหภูมิประมาณ 75-90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงพบว่า สภาวะที่ดีที่สุดในการลดปริมาณลิกนิน คือ การปรับสภาพด้วยไอน้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมงและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 %wt/v ที่อุณหภูมิประมาณ 75-90 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งปริมาณลดลงเหลือร้อยละ 11.55 เมื่อคิดเป็นร้อยละการลดลง สามารถลดปริมาณลิกนินได้ถึงร้อยละ 47.43

การตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของฟางข้าว โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง รุป 3.5-3.7 ภาพสัณฐานวิทยาของฟางข้าวจากการปรับสภาพด้วยไอน้ำเวลา 2 ชั่วโมงและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 %wt/v (รูป 3.5) มีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดคือ เส้นใยเริ่มเกิดการแยกตัว และแตกออกเป็นบางส่วน การปรับสภาพด้วยไอน้ำเวลา 4 ชั่วโมงและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 %wt/v (รูป 3.6) จะมีการแตกออกของเส้นใยมากขึ้นกว่าเดิม และสภาวะที่เห็นการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนคือ การปรับสภาพด้วยไอน้ำเวลา 6 ชั่วโมงและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 %wt/v (รูป 3.7) จะเห็นว่าพื้นผิวฟางข้าวยุบมากขึ้น ซึ่งอาจเป็นการเพิ่มโอกาสที่ทำให้กระบวนการย่อยเซลลูโลสที่เหลือในฟางข้าวได้ เพราะโครงสร้างของลิกนินอาจแตกออกและหลุดไป โดยมีการจัดเรียงตัวขององค์ประกอบฟางข้าวหลังผ่านการปรับสภาพ ดังรูป 1.8 แม้ว่าจากการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของฟางข้าวหลังปรับสภาพด้วย

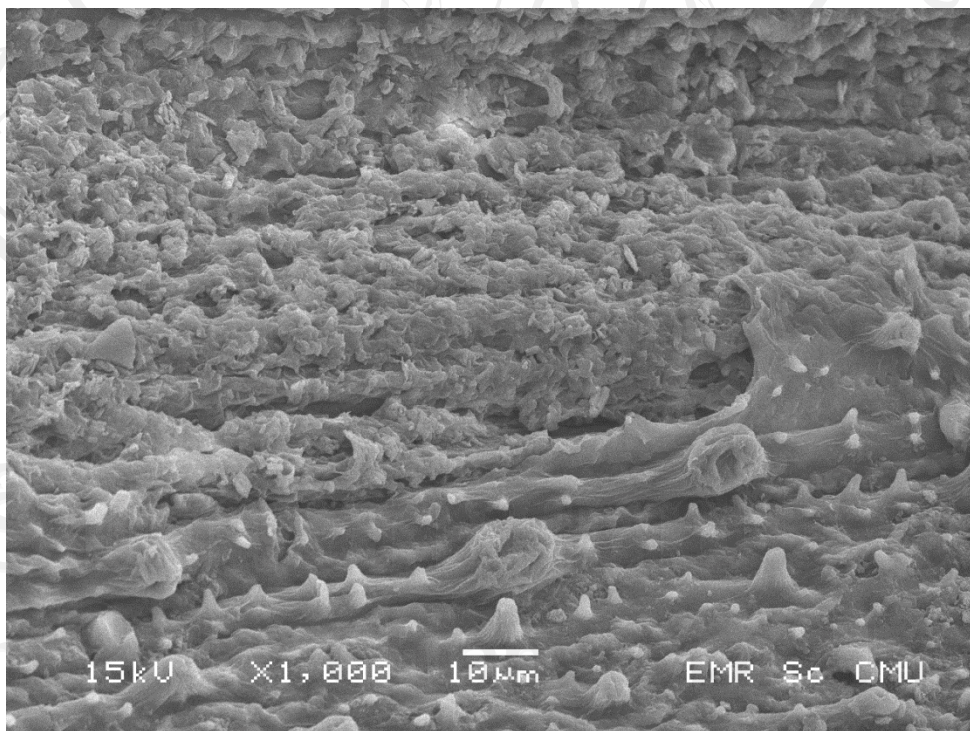
ไอน้ำเป็นเวลา 6 ชั่วโมง และ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2%wt/v มีพื้นที่ผิวของฟางข้าวอยู่มากกว่าก็ตาม แต่เมื่อพิจารณาประกอบกับผลของปริมาณเซลลูโลสที่คงอยู่ และปริมาณลิกนินที่ลดลงดังตาราง 3.4 สภาวะที่ปรับสภาพด้วยไอน้ำเวลา 2 ชั่วโมงและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 %wt/v สามารถลดลิกนินได้มากกว่า และยังคงเหลือเซลลูโลสในฟางข้าวปริมาณที่มากกว่า ดังนั้นสภาวะที่สมควรนำไปทดลองต่อคือสภาวะที่ปรับสภาพด้วยไอน้ำเวลา 2 ชั่วโมง



รูป 3.5 สัณฐานวิทยาของฟางข้าวหลังปรับสภาพด้วยไอน้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมงและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 %wt/v โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูป 3.6 สัณฐานวิทยาของฟางข้าวหลังปรับสภาพด้วยไอน้ำเป็นเวลา 4 ชั่วโมงและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 %wt/v โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

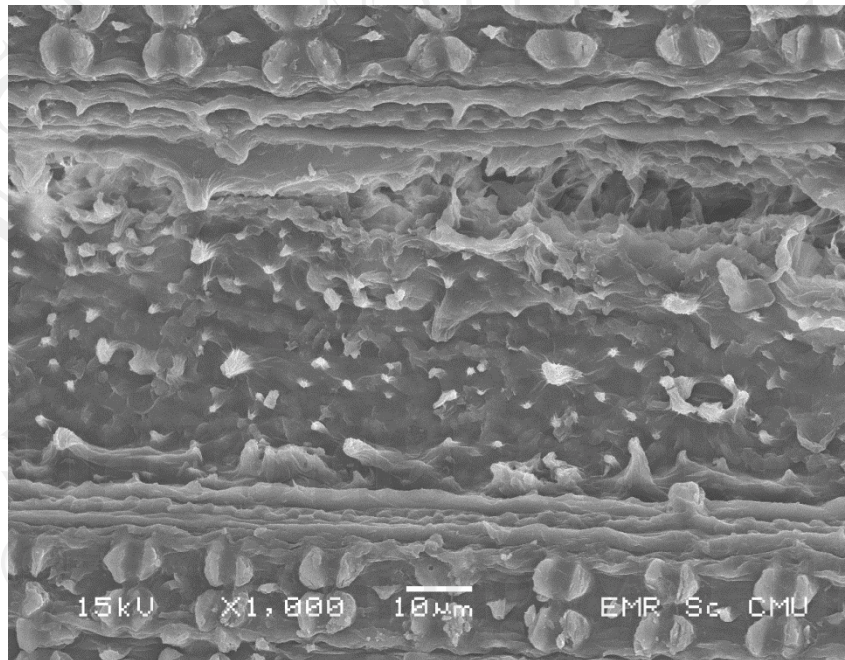


รูป 3.7 สัณฐานวิทยาของฟางข้าวหลังปรับสภาพด้วยไอน้ำเป็นเวลา 6 ชั่วโมงและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 %wt/v โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

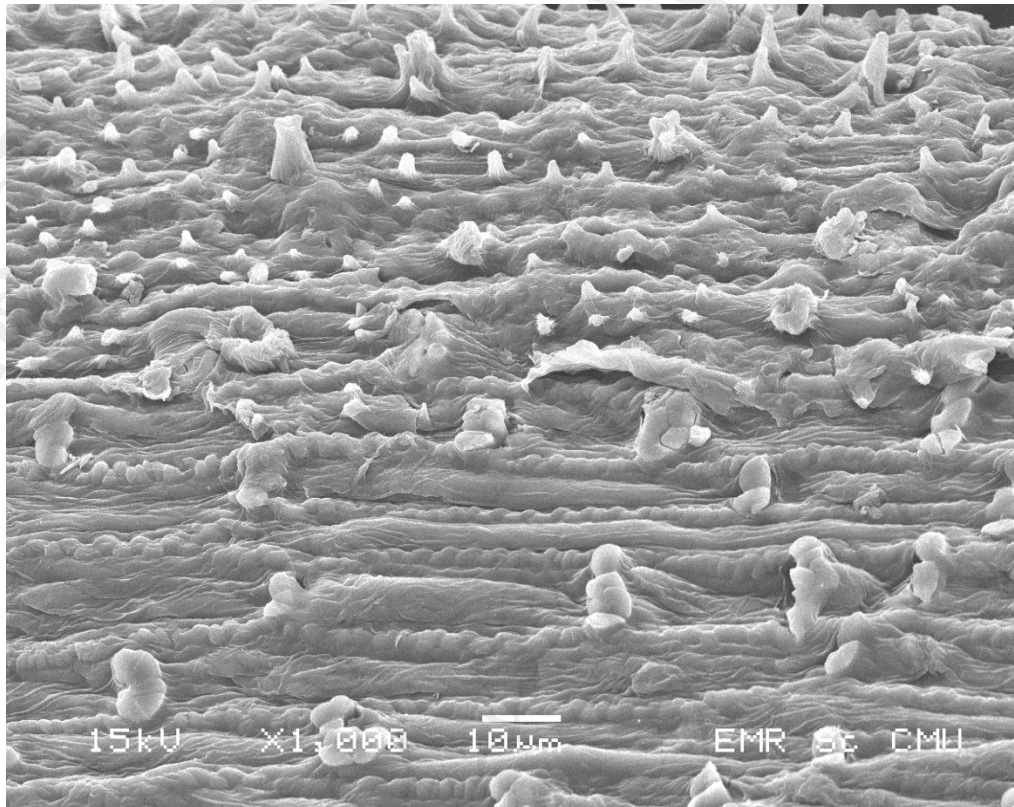
เมื่อนำฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยไอน้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง มาปรับสภาพต่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 และ 3 %wt/v ตามเงื่อนไขการทดลองทำนองเดียวกันกับการปรับสภาพด้วยไอน้ำ และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2%wt/v ผลการปรับสภาพแสดงในตาราง 3.5 และผลสัณฐานวิทยาของฟางข้าว ดังรูป 3.8 และ 3.9

ตาราง 3.5 องค์ประกอบทางเคมีของฟางข้าวก่อนและหลังปรับสภาพด้วยไอน้ำและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 และ 3 %wt/v

สถานะ	ลิกนิน (ร้อยละ)	เซลลูโลส (ร้อยละ)	เฮมิเซลลูโลส (ร้อยละ)
ไอน้ำ 2 ชั่วโมงและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 %wt/v	14.90	54.50	21.87
ไอน้ำ 2 ชั่วโมงและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3 %wt/v	11.16	39.44	19.24



รูป 3.8 สัณฐานวิทยาของฟางข้าวหลังปรับสภาพด้วยไอน้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมงและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 %wt/v โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูป 3.9 สัณฐานวิทยาของฟางข้าวหลังปรับสภาพด้วยไอน้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมงและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 3 %wt/v โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากตาราง 3.5 การปรับสภาพด้วยไอน้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 และ 3 %wt/v ปริมาณลิกนินลดลงเหลือร้อยละ 14.90 และ 11.16 ตามลำดับ

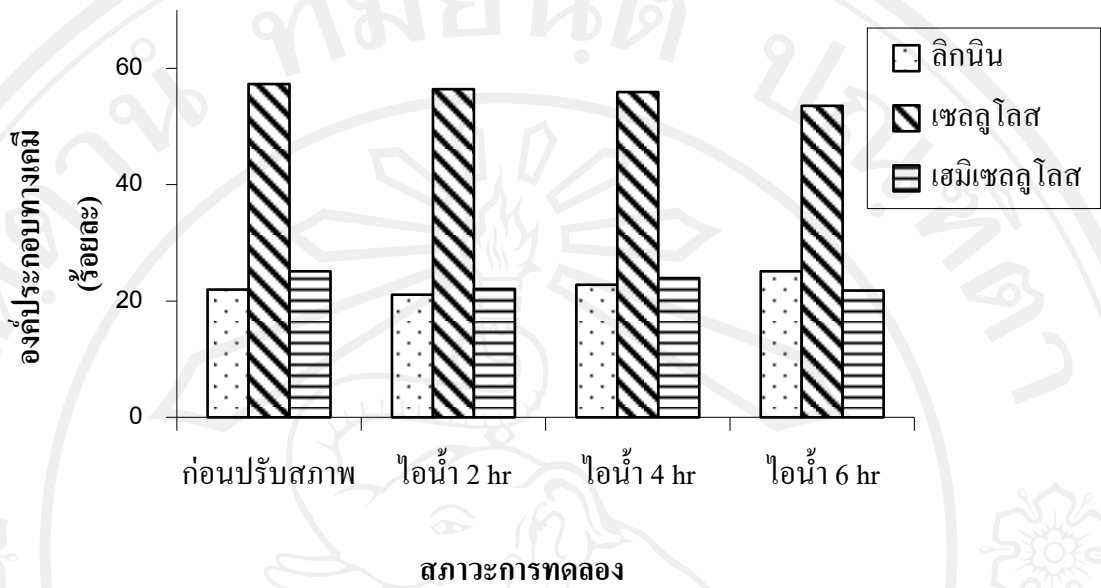
การตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของฟางข้าว รูปที่ 3.8-3.9 ภาพสัณฐานวิทยาของฟางข้าวเมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างสองสภาวะนี้ จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น พื้นผิวจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดคือ เส้นใยเกิดการพองตัวมากขึ้น และยังเกิดการผิรูปร่างมากขึ้นอีกด้วย

3.2.3 สรุปเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของฟางข้าวก่อนและหลังทำการปรับสภาพด้วยไอน้ำ และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

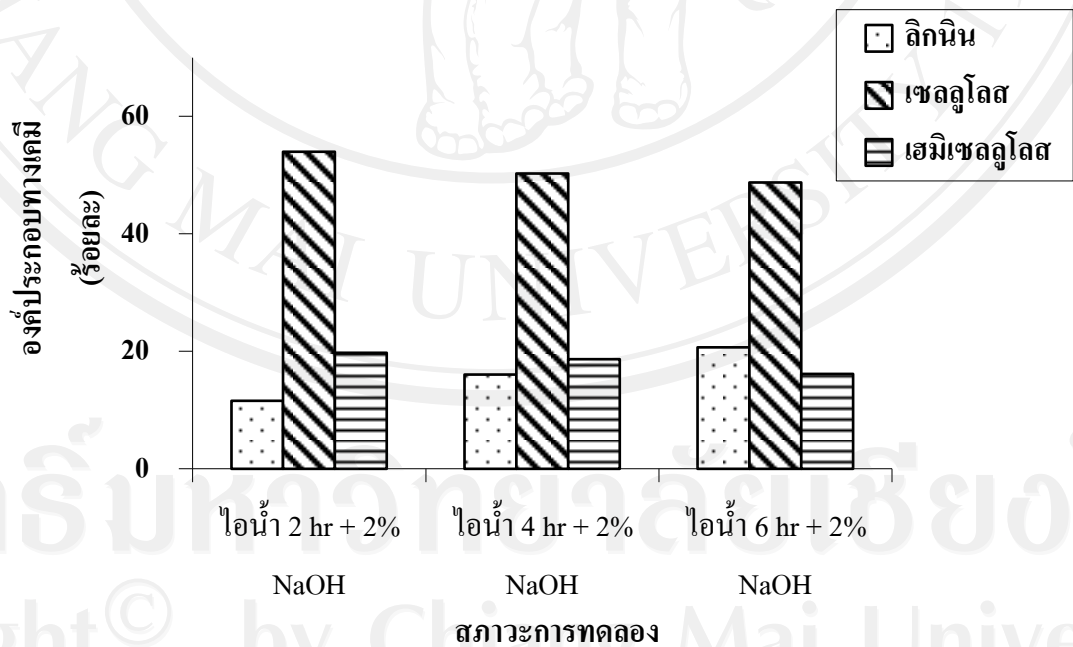
สรุปเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของฟางข้าวก่อนและหลังทำการปรับสภาพด้วยไอน้ำ และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังตาราง 3.6 และ 3.7 และรูป 3.10-3.12

ตาราง 3.6 เปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของฟางข้าวของการปรับสภาพทุกสภาวะ

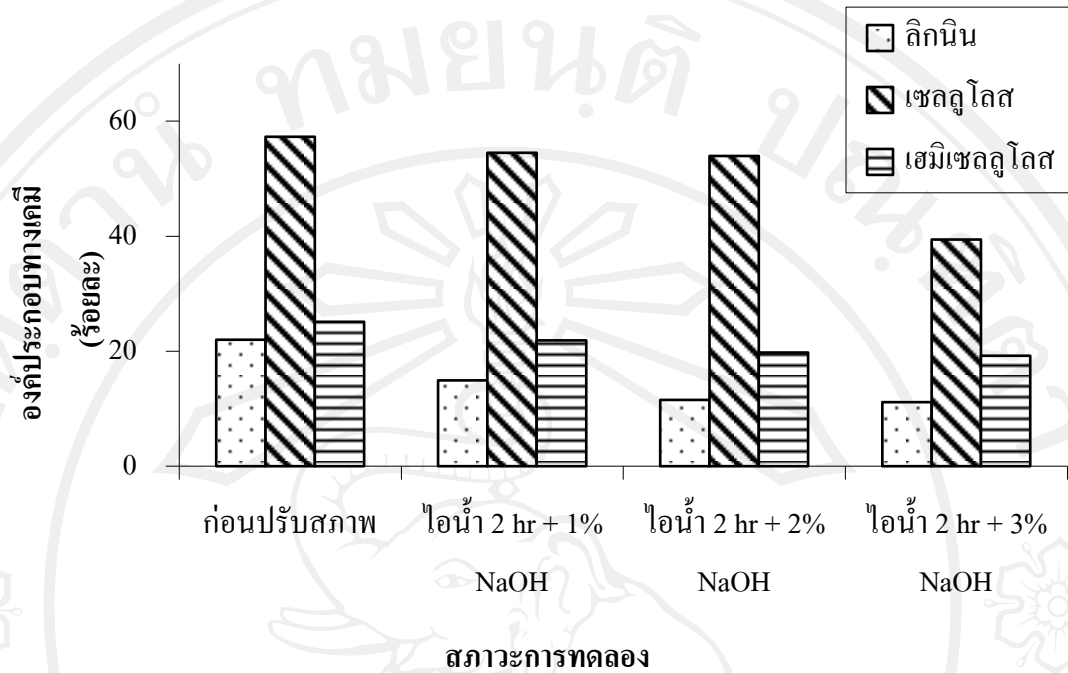
การปรับสภาพ	ลิกนิน (ร้อยละ)	เซลลูโลส (ร้อยละ)	เฮมิเซลลูโลส (ร้อยละ)
ก่อนปรับสภาพ	21.97	57.30	25.11
ไอน้ำ 2 hr	21.07	56.40	22.06
ไอน้ำ 4 hr	22.78	55.93	23.93
ไอน้ำ 6 hr	25.10	53.58	21.78
ไอน้ำ 2 hr + 2% NaOH	11.55	53.95	19.75
ไอน้ำ 4 hr + 2% NaOH	16.07	50.28	18.64
ไอน้ำ 6 hr + 2% NaOH	20.66	48.76	16.13
ไอน้ำ 2 hr + 1% NaOH	14.90	54.50	21.87
ไอน้ำ 2 hr + 3% NaOH	11.16	39.44	19.24



รูป 3.10 ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของฟางข้าวก่อนปรับสภาพ หลังปรับสภาพด้วยไอน้ำเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง



รูป 3.11 ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของฟางข้าวหลังปรับสภาพด้วยไอน้ำเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง แล้วปรับสภาพต่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2%wt/v



รูป 3.12 ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของฟางข้าวหลังปรับสภาพด้วยไอน้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วปรับสภาพต่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1, 2 และ 3%wt/v

ตาราง 3.7 ร้อยละการลดลงขององค์ประกอบทางเคมีของฟางข้าวหลังการปรับสภาพ

สภาวะ	ลิกนิน (% reduction)	เซลลูโลส (% reduction)	เฮมิเซลลูโลส (% reduction)
ใอน้ำ 2 hr	4.10	1.57	12.15
ใอน้ำ 4 hr	3.56*	2.39	4.70
ใอน้ำ 6 hr	12.47*	6.49	13.26
ใอน้ำ 2 hr + 2% NaOH	47.43	5.85	21.35
ใอน้ำ 4 hr + 2% NaOH	26.85	12.25	25.77
ใอน้ำ 6 hr + 2% NaOH	5.96	14.90	35.76
ใอน้ำ 2 hr + 1% NaOH	32.18	4.89	12.90
ใอน้ำ 2 hr + 3% NaOH	49.20	31.17	23.38

*หมายเหตุ ร้อยละการเพิ่มขึ้นของปริมาณลิกนินเนื่องจากเกิดลิกนินเทียมตั้งอธิบายมาแล้ว

จากการปรับสภาพฟางข้าวทุกสภาวะดังตาราง 3.6 และรูป 3.10-3.12 พบว่า เมื่อปรับสภาพฟางข้าวด้วยไอน้ำที่ความดันประมาณ 1-2 บาร์ อุณหภูมิประมาณ 100-130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2,4 และ 6 ชั่วโมงพบว่าปริมาณลิกนินลดลงเหลือร้อยละ 21.07 ในสภาวะที่ปรับสภาพเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แต่เมื่อทำการเพิ่มเวลาในการปรับสภาพเป็น 4 และ 6 ชั่วโมง ปริมาณลิกนินเพิ่มมากขึ้นเป็นร้อยละ 22.78 และ 25.10 ตามลำดับ เนื่องจากเกิดลิกนินเทียม เมื่อพิจารณาปริมาณเซลลูโลสภายในฟางข้าว พบว่า มีปริมาณลดลงเมื่อทำการเพิ่มเวลาในการปรับสภาพจาก 2 ชั่วโมงเป็น 4 และ 6 ชั่วโมง ซึ่งเหลือปริมาณเซลลูโลสภายในฟางข้าวที่สูงอยู่ถึงร้อยละ 56.40, 55.93 และ 53.58 ตามลำดับ จากการปรับสภาพฟางข้าวด้วยไอน้ำนั้น ทำให้เกิดลิกนินเทียม จึงทำการปรับสภาพฟางข้าวต่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

เมื่อนำฟางข้าวที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพด้วยไอน้ำแล้ว มาปรับสภาพต่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าปริมาณองค์ประกอบทางเคมีลดลงตามเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น จากการปรับสภาพฟางข้าวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สภาวะการปรับสภาพที่สามารถลดปริมาณลิกนินได้มากที่สุด คือ การปรับสภาพด้วยไอน้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และปรับสภาพต่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ลิกนินคงเหลือเพียงร้อยละ 11.16 และเซลลูโลสคงเหลือร้อยละ 39.44 เมื่อนำผลร้อยละการลดลงขององค์ประกอบทางเคมีที่ได้มาเปรียบเทียบกับสภาวะการปรับสภาพด้วยไอน้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และปรับสภาพต่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ดังตาราง 3.7 พบว่า ร้อยละการลดลงของลิกนินมีค่าใกล้เคียงกันคือร้อยละ 49.20 และ 47.43 ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาถึงร้อยละการลดลงของปริมาณเซลลูโลส สภาวะการปรับสภาพด้วยไอน้ำ 2 ชั่วโมงและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ปริมาณเซลลูโลสลดลงมากถึงร้อยละ 31.17 แต่ในการปรับสภาพด้วยไอน้ำ 2 ชั่วโมงและและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ปริมาณเซลลูโลสลดลงเพียงร้อยละ 5.85 จึงเลือกสภาวะการปรับสภาพด้วยไอน้ำ 2 ชั่วโมง และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพข้าว

จากผลงานวิจัยในการศึกษาทดลองนี้ จะเห็นได้ว่าองค์ความรู้ที่ได้เป็นที่น่าสนใจมาก เพราะใช้อุณหภูมิต่ำเพียงประมาณ 100-130 องศาเซลเซียส และความดันใกล้เคียงบรรยากาศ คือ ประมาณ 1-2 บาร์ ประกอบกับเวลาที่ใช้ในการระบือน้อยเพียง 2 ชั่วโมงสำหรับไอน้ำ รวมทั้งยังใช้

ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์น้อยคือที่ 2%wt/v และอุณหภูมิปฏิบัติการต่ำประมาณ 75-90 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการปฏิบัติการ 1 ชั่วโมง ก็ยังสามารถทำให้ปริมาณลิกนินลดลงได้มากถึงร้อยละ 47.43 และคงเหลือเซลลูโลสในปริมาณที่มากในฟางข้าวถึงร้อยละ 94.15 ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อไปในการเปลี่ยนเป็นเอทานอลมาก

นำผลการทดลองของงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆในทางเดียวกัน แสดงดังตาราง

3.8

ตาราง 3.8 เปรียบเทียบผลการปรับสภาพชีวมวลด้วยไอน้ำและ/หรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความดันบรรยากาศ

งานวิจัย	วัตถุดิบ	สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์			ผลการทดลอง		
		ความเข้มข้น (%wt/v)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (hr)	% ลิกนินลดลง	ปริมาณกลูโคส	ปริมาณเอทานอล
Zhang ⁽⁴⁰⁾	ฟางข้าว	2	85	1	36.24	2.231g/L	-
ศิริพงษ์ ⁽⁴¹⁾	ปอสา	10	80	3	-	-	1.62%
Sharma ⁽⁴²⁾	ต้นทานตะวัน	ผ่านไอน้ำมาแล้วที่ความดัน 1.03 บาร์เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง					
		0.5	-	1.5	-	277.6mg/g	-
งานวิจัยนี้	ฟางข้าว	ผ่านไอน้ำมาแล้วที่ความดัน 1-2 บาร์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง					
		2	75-90	1	47.43	-	3.19%

เมื่อนำงานวิจัยต่างๆมาเปรียบเทียบผลหลังการปรับสภาพด้วยไอน้ำและ/หรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่า ปริมาณลิกนินลดลงหลังการปรับสภาพซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang⁽⁴⁰⁾ จากงานวิจัยของศิริพงษ์⁽⁴¹⁾ จะเห็นได้ว่าสภาวะในการทดลองใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้แต่ชนิดของชีวมวลต่างกัน ก็ให้ปริมาณเอทานอลที่ต่างกันด้วย จึงควรมีการเลือกชนิดชีวมวลให้เหมาะสมกับกระบวนการผลิต และในงานวิจัยของ Sharma⁽⁴²⁾ ก็ใช้ชีวมวลต่างชนิดกันคือใช้ต้น

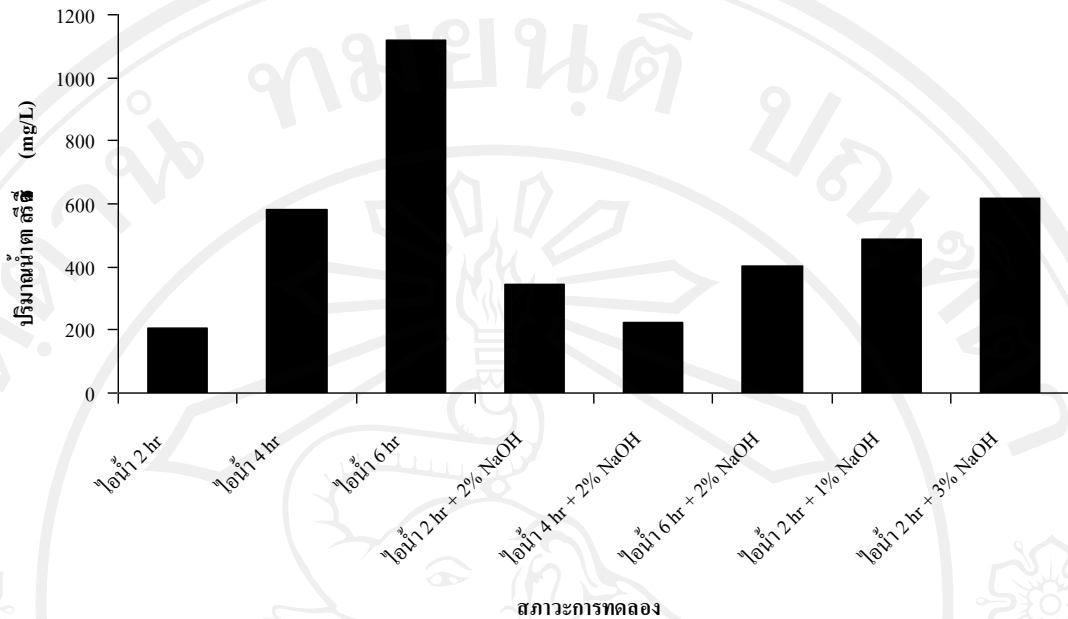
ทานตะวัน ซึ่งได้ผลผลิตก้นน้ำตาลต่ำมากเมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Zhang⁽⁴⁰⁾ อาจเนื่องมาจากวิธีการปรับสภาพไม่เหมาะสมกับชนิดของชีวมวล

3.3 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในของเหลวที่ได้จากการปรับสภาพฟางข้าว

ของเหลวที่นำมาวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์นี้ ได้มาจากหลังกระบวนการปรับสภาพฟางข้าว ซึ่งทำการกรองของเหลวมาออกจากของแข็งหลังการปรับสภาพในแต่ละสถานะ ผลดังตาราง 3.9 และรูป 3.13

ตาราง 3.9 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในของเหลวที่ได้จากการปรับสภาพฟางข้าว

สถานะ	ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
ไอน้ำ 2 hr	205.21
ไอน้ำ 4 hr	584.14
ไอน้ำ 6 hr	1,119.56
ไอน้ำ 2 hr + 2% NaOH	345.92
ไอน้ำ 4 hr + 2% NaOH	224.70
ไอน้ำ 6 hr + 2% NaOH	400.88
ไอน้ำ 2 hr + 1% NaOH	487.60
ไอน้ำ 2 hr + 3% NaOH	616.40

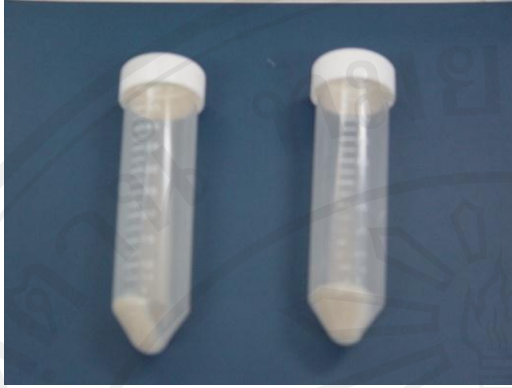


รูป 3.13 ปริมาณน้ำตาลซูโครสที่ได้จากการปรับสภาพฟางข้าวสภาวะต่างๆ

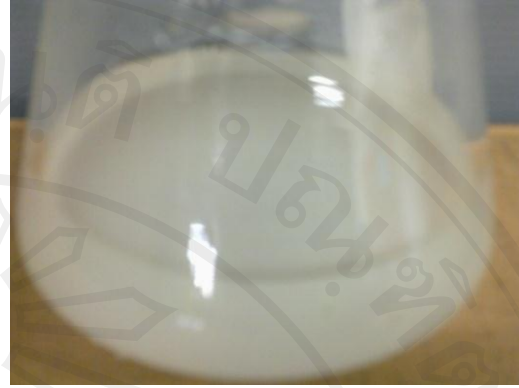
จากตาราง 3.9 จะเห็นว่าปริมาณน้ำตาลซูโครสที่ได้จากของเหลวหลังการปรับสภาพฟางข้าวของทุกสภาวะอยู่ในช่วง 205.21-1,119.56 มิลลิกรัมต่อลิตร ของเหลวที่ได้จากงานวิจัยนี้ เมื่อตรวจสอบค่าน้ำตาลซูโครสซึ่งเป็นตัวบ่งบอกความเหมาะสม พบว่ามีค่าน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Mohammed⁽¹⁶⁾ และ Zhu และคณะ⁽¹⁸⁾ ซึ่งพบว่า งานของ Mohammed และ Zhang นั้นสามารถผลิตน้ำตาลได้สูงถึง 17.5 และ 35.6 กรัมต่อลิตร ดังนั้นน้ำตาลซูโครสที่ได้จากการปรับสภาพในงานวิจัยนี้จึงไม่เหมาะสมที่จะนำไปผ่านกระบวนการหมักเพื่อผลิตเอทานอล

3.4 การผลิตเอทานอลจากการหมักน้ำตาลกลูโคส

การผลิตเอทานอลจากน้ำตาลกลูโคส เป็นการนำตะกอนเซลล์ของจุลินทรีย์แต่ละชนิดที่เลี้ยงได้ ดังรูป 3.14 มาเติมในสารละลายน้ำตาลกลูโคสเพื่อผลิตเอทานอล ดังรูป 3.15 เมื่อทำการหมักน้ำตาลกลูโคสครบตามระยะเวลาจึงนำสารละลายที่ได้ไปวัดปริมาณเอทานอลที่เกิดขึ้น สภาวะในการทดลองนี้ ดังหัวข้อ 2.5.1



รูป 3.14 ตะกอนเซลล์



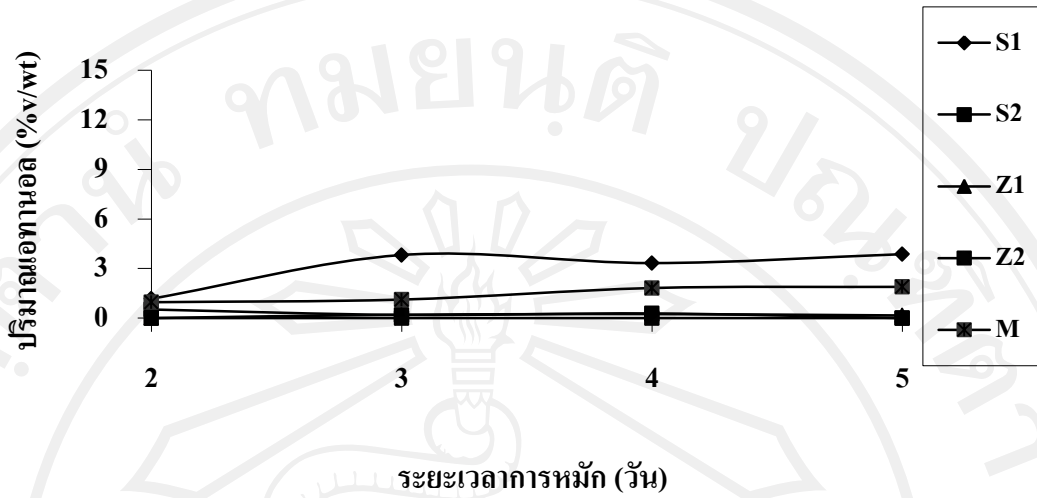
รูป 3.15 สารละลายน้ำตาลกลูโคสหลังเติมตะกอนเซลล์

ผลการวิเคราะห์ปริมาณเอทานอลจากการหมักน้ำตาลกลูโคสเพื่อหาจุลินทรีย์ที่สามารถเปลี่ยนน้ำตาลกลูโคสเป็นเอทานอลได้ปริมาณสูงที่สุด ในการทดลองนี้กระทำที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส และทำการเขย่า 150 รอบต่อนาที ความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7⁽¹³⁾

จากตาราง 3.10 และรูป 3.16 พบว่า เมื่อใช้จุลินทรีย์แต่ละชนิดในการหมักน้ำตาลกลูโคส ยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* V1116 (S1) สามารถผลิตเอทานอลได้สูงที่สุด 3.87 %v/wt ในวันที่ 5

ตาราง 3.10 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเอทานอลจากการหมักน้ำตาลกลูโคสของแต่ละชนิด

		ปริมาณเอทานอล (%v/wt)				
		S1	S2	Z1	Z2	M
ชนิดจุลินทรีย์	ระยะเวลาการหมัก (วัน)					
	2	1.17	0.52	0	0.00	0.96
	3	3.82	0.19	0.20	0.00	1.12
	4	3.33	0.28	0.24	0.00	1.82
	5	3.87	0	0.16	0.00	1.89

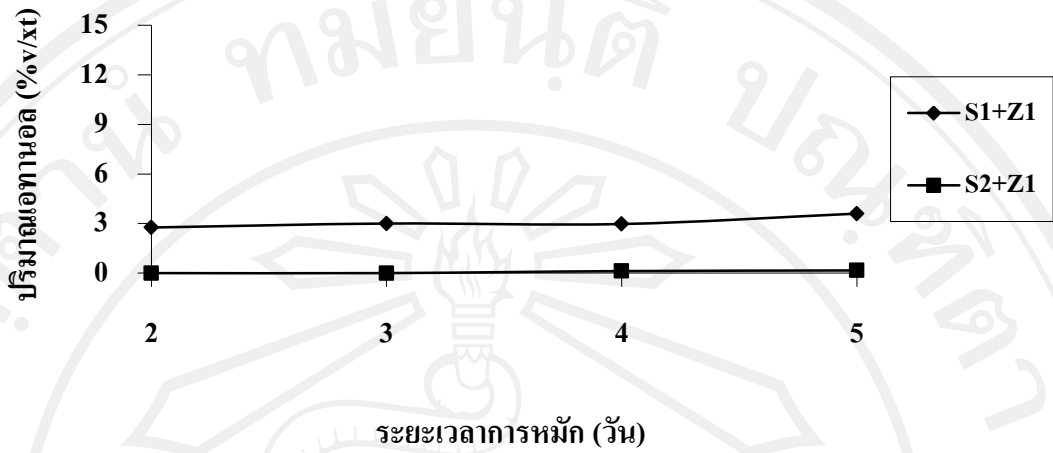


รูป 3.16 ปริมาณเอทานอลจากการหมักน้ำตาลกลูโคสโดยใช้แต่จุลินทรีย์แต่ละชนิด

ในการทดลองขั้นต่อไป ผู้วิจัยได้ทำการหมักน้ำตาลกลูโคสโดยศึกษาการทำงานร่วมกันระหว่างยีสต์และแบคทีเรีย ดังตาราง 3.11

ตาราง 3.11 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเอทานอลจากการหมักน้ำตาลกลูโคสของยีสต์ทำงานร่วมกับแบคทีเรีย

ปริมาณเอทานอล (%v/wt)		
ชนิดจุลินทรีย์	S1+Z1	S2+Z1
ระยะเวลาการหมัก (วัน)		
2	2.76	0.00
3	3.00	0.00
4	2.97	0.12
5	3.60	0.16



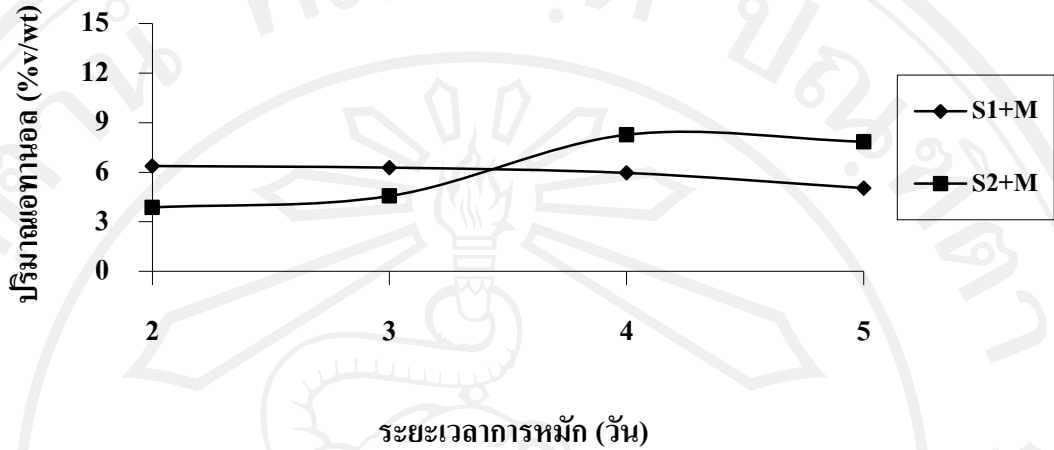
รูป 3.17 ปริมาณเอทานอลจากการหมักน้ำตาลกลูโคสโดยใช้ยีสต์ทำงานร่วมกับแบคทีเรีย

ผลของปริมาณเอทานอลจากการทำงานร่วมกันระหว่างยีสต์ และแบคทีเรีย ดังตาราง 3.11 และรูป 3.17 พบว่า เมื่อทำการหมักน้ำตาลกลูโคสโดยใช้ยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* V1116 (S1) และ *Saccharomyces cerevisiae* (S2) ทำงานร่วมกับแบคทีเรียตัวเดียวกันคือ *Zymomonas sp.* TISTR1102 (Z1) ปริมาณของเอทานอลสูงที่สุดคือ 3.60 %v/wt ซึ่งจะเห็นว่าปริมาณเอทานอลที่ได้ไม่สูงมากนักเมื่อเปรียบเทียบกับการทำงานร่วมกันของจุลินทรีย์ทั้ง 3 ชนิด

ในการทดลองขั้นต่อไป ผู้วิจัยได้ทำการหมักน้ำตาลกลูโคสโดยศึกษาการทำงานร่วมกันระหว่างยีสต์และรา ดังตาราง 3.12

ตาราง 3.12 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเอทานอลจากการหมักน้ำตาลกลูโคสของยีสต์ทำงานร่วมกับรา

ปริมาณเอทานอล (%v/wt)		
ชนิดจุลินทรีย์	S1+M	S2+M
ระยะเวลาการหมัก (วัน)		
2	6.38	3.87
3	6.28	4.56
4	5.96	8.27
5	5.04	7.85



รูป 3.18 ปริมาณเอทานอลจากการหมักน้ำตาลกลูโคสโดยใช้ยีสต์ทำงานร่วมกับรา

จากผลของปริมาณเอทานอลที่ได้ ดังตาราง 3.12 และรูป 3.18 จะสังเกตได้ว่า เมื่อนำยีสต์มาทำงานร่วมกับรา ปริมาณ เอทานอลที่ได้มีค่าสูงขึ้นมา สูงสุดอยู่ที่ 8.27 %v/wt ของ *Saccharomyces cerevisiae* (S2) ทำงานร่วมกับ *Mucor indicus* (M) เมื่อเทียบกับ การทำงานของ จุลินทรีย์เพียงชนิดเดียว ดังตาราง 3.10 ซึ่งปริมาณเอทานอลสูงสุดที่สุดเพียง 3.87 %v/wt อาจเป็นไปได้ว่า ยีสต์และราอาจมีประสิทธิภาพในการทำงานเพิ่มขึ้นเมื่อนำมาทำงานร่วมกัน

ตาราง 3.13 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเอทานอลจากการหมักน้ำตาลกลูโคสของแบคทีเรียทำงานร่วมกับรา

ปริมาณเอทานอล (%v/wt)	
ชนิดจุลินทรีย์	Z1+M
ระยะเวลาการหมัก (วัน)	
2	0.44
3	0.73
4	0.78
5	0.82



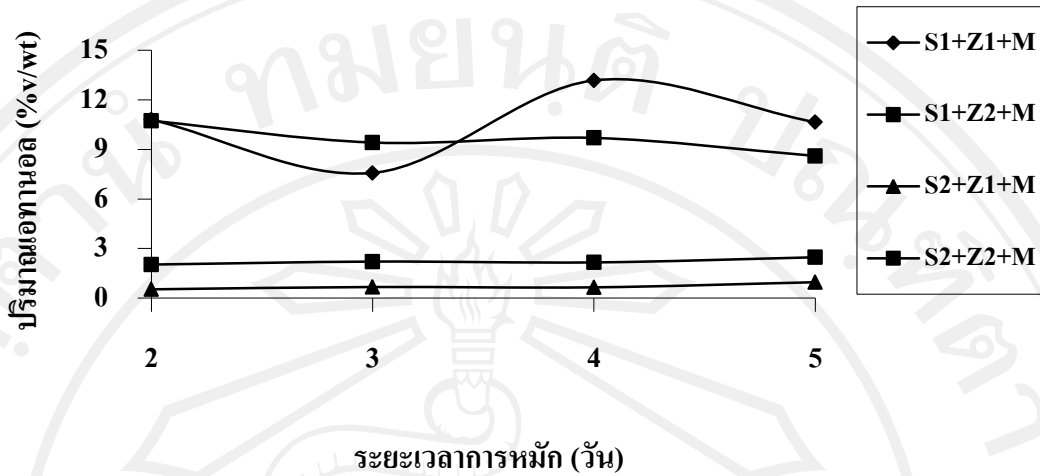
รูป 3.19 ปริมาณเอทานอลจากการหมักน้ำตาลกลูโคสโดยใช้แบคทีเรียทำงานร่วมกับรา

ปริมาณเอทานอลจากการหมักน้ำตาลกลูโคสโดยใช้แบคทีเรียทำงานร่วมกับราที่ได้มีปริมาณสูงสุดอยู่ที่ 0.82 % v/wt เมื่อทำการหมักเป็นเวลา 5 วัน

จากการทดลองดังตาราง 3.10-3.13 ปริมาณเอทานอลที่ได้จากการหมักน้ำตาลกลูโคสยังไม่สูงมากนัก ผู้วิจัยจึงได้ทำการนำจุลินทรีย์ทั้ง 3 ชนิด มาทำงานร่วมกัน ในการทดลองขั้นต่อไป ผู้วิจัยได้ทำการหมักน้ำตาลกลูโคส โดยศึกษาการทำงานร่วมกันระหว่างยีสต์ แบคทีเรีย และรา ดังตาราง 3.14

ตาราง 3.14 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเอทานอลจากการหมักน้ำตาลกลูโคสของยีสต์ทำงานร่วมกับแบคทีเรีย และรา

		ปริมาณเอทานอล (%v/wt)			
		S1+Z1+M	S1+Z2+M	S2+Z1+M	S2+Z2+M
ระยะเวลาการหมัก (วัน)	ชนิดจุลินทรีย์				
	2		10.81	10.74	0.53
3		7.58	9.42	0.67	2.21
4		13.18	9.70	0.65	2.16
5		10.65	8.61	0.96	2.47



รูป 3.20 ปริมาณเอทานอลจากการหมักน้ำตาลกลูโคสโดยใช้ยีสต์ทำงานร่วมกับแบคทีเรีย และรา

จากการทำงานร่วมกันของจุลินทรีย์ทั้ง 3 ชนิด ยีสต์ แบคทีเรีย และรา ผลดังตาราง 3.14 และรูป 3.20 พบว่า การหมักน้ำตาลกลูโคสโดยใช้ยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* V1116 (S1) ทำงานร่วมกับแบคทีเรีย *Zymomonas sp.* TISTR1102 (Z1) และรา *Mucor indicus* (M) สามารถผลิตเอทานอลได้สูงที่สุด โดยสามารถผลิตได้ 13.18%v/wt ในระยะเวลาการหมักที่ 4

เนื่องจากในกระบวนการหมักน้ำตาลกลูโคสเป็นเอทานอลนี้ ใช้จุลินทรีย์หลายชนิดทำงานร่วมกัน เมื่อนำจุลินทรีย์เข้าทำปฏิกิริยาชนิดที่มีมากกว่าหรือทำงานได้ดีกว่าจะเป็นตัวทำงาน ทำให้เกิดการแข่งขันกันในระบบ ส่งผลให้ปริมาณเอทานอลที่ได้อาจจะไม่สูงมากนัก จึงควรมีการวัดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ว่าเติบโตเต็มที่ในระยะเวลาที่ชั่วโมงก่อนที่จะนำจุลินทรีย์ชนิดนั้นๆมาใช้

จากการหมักน้ำตาลกลูโคสเพื่อผลิตเอทานอล ดังตาราง 3.10 – 3.14 และรูป 3.16 – 3.20 ปริมาณเอทานอลสูงสุดที่ได้คือ 13.18 %v/wt จากการทำงานร่วมกันของยีสต์ (S1) ทำงานร่วมกับแบคทีเรีย (Z1) และรา (M) ดังนั้น สภาวะการทำงานร่วมกันนี้ จะนำไปใช้ในกระบวนการหมักฟางข้าวด้วยกระบวนการหมักแบบต่อเนื่อง (Simultaneous Saccharification and Fermentation) ต่อไป

3.5 การผลิตเอทานอลจากฟางข้าวที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพแล้ว

การผลิตเอทานอลจากฟางข้าวที่ปรับสภาพแล้วเลือกใช้กระบวนการหมักแบบต่อเนื่อง (Simultaneous Saccharification and Fermentation; SSF) เนื่องจากเป็นการลดต้นทุน ปริมาณสารยับยั้งที่เกิด และลดความเข้มข้นกลูโคสลงเพื่อไม่ให้เกิดการยับยั้งการหมักโดยกลูโคส⁽²⁾

การผลิตเอทานอลจากฟางข้าวมีปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น 2 ปฏิกิริยาดังนี้⁽¹⁴⁾

1. ปฏิกิริยาแซคคาริฟิเคชัน (Saccharification) เป็นปฏิกิริยาการเปลี่ยนจากเซลลูโลสเป็นน้ำตาลกลูโคส โดยใช้เอนไซม์เซลลูเลสจากแบคทีเรีย ซึ่งจะทำการเติมแบคทีเรียลงไปในการบวกรวม และมีการปรับเปลี่ยนชนิดของแบคทีเรียต่อไป เพื่อเลือกชนิดของแบคทีเรียที่เหมาะสมที่สุดในการเกิดปฏิกิริยาแซคคาริฟิเคชัน

2. ปฏิกิริยาการหมัก เป็นการหมักน้ำตาลกลูโคสให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเอทานอล ซึ่งในส่วนนี้ ได้สภาวะการทดลองมาจากข้อ 3.4 แล้ว คือ ยีสต์ (S1) ทำงานร่วมกับแบคทีเรีย (Z1) และรา (M)

การทดลองส่วนนี้เป็นการวิเคราะห์ปริมาณเอทานอลจากการหมักฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว โดยใช้กระบวนการ SSF ณ อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส และทำการเขย่าที่ 150 รอบต่อนาที ดังรูป 3.21 เมื่อทำการเติมตะกอนเซลล์ลงไปในฟางข้าวแล้ว จะไม่สามารถมองเห็นตะกอนเซลล์ได้ เนื่องจากตะกอนเซลล์ถูกปกคลุมไปด้วยฟางข้าว ซึ่งระยะเวลาในการหมักของกระบวนการนี้คือ 2, 3, 4 และ 5 วัน



รูป 3.21 การหมักฟางข้าวในกระบวนการหมักแบบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส และทำการเขย่าที่ 150 รอบต่อนาที

การทดลองส่วนนี้ได้มาจากการปรับสภาพฟางข้าวที่เตรียมจากฟางข้าว 50 กรัม (Small Batch) และ 300 กรัม (Big Batch) เพื่อเปรียบเทียบผลของปริมาณเอทานอลจากการเตรียมตัวอย่างในปริมาณที่ต่างกัน

ตาราง 3.15 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเอทานอลจากการหมักฟางข้าวโดยใช้แบคทีเรีย *Pumilus* ในกระบวนการ SSF

ปริมาณเอทานอล (%v/wt)		
ชนิดจุลินทรีย์ ระยะเวลาการหมัก (วัน)	<i>Pumilus</i>	
	Small Batch	Big Batch
2	0.47	0.47
3	0.61	0.69
4	0.63	0.76
5	0.69	0.76

จากผลการทดลองทำให้ทราบว่าปริมาณเอทานอลที่ได้จากการเตรียมฟางข้าวจากการปรับสภาพครั้งละ 50 กรัม (Small Batch) และการเตรียมฟางข้าวจากการปรับสภาพครั้งละ 300 กรัม (Big Batch) ดังตาราง 3.15 มีค่าใกล้เคียงกัน จากนั้นจึงทำการเตรียมตัวอย่างแบบ Big Batch ในการทดลองต่อไป เพื่อเป็นการประหยัดเวลาในการเตรียมตัวอย่าง

การทดลองดังตาราง 3.16 เป็นการวิเคราะห์ปริมาณเอทานอลจากการหมักฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว โดยใช้กระบวนการ SSF ณ อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส และทำการเขย่าที่ 150 รอบต่อนาที ซึ่งระยะเวลาในการหมักของกระบวนการนี้คือ 2, 3, 4 และ 5 วัน เช่นเดียวกับ ตาราง 3.15

ตาราง 3.16 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเอทานอลจากการหมักฟางข้าวของแบคทีเรียแต่ละชนิดในกระบวนการ SSF ณ อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส และทำการเขย่าที่ 150 รอบต่อนาที

ปริมาณเอทานอล (%v/wt)				
ชนิดจุลินทรีย์ ระยะเวลาการหมัก (วัน)	<i>Pumilus</i>	<i>Bacillus sp.</i> (1)	<i>Bacillus sp.</i> (2)	<i>Bacillus sp.</i> (3)
2	0.47	0.00	0.79	0.52
3	0.69	0.39	0.78	0.53
4	0.76	0.30	0.69	0.53
5	0.76	0.49	0.54	0.54



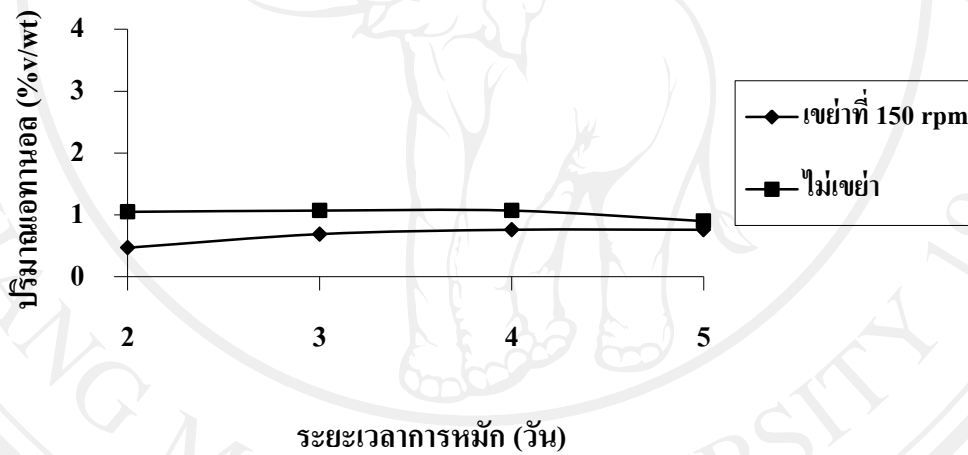
รูป 3.22 ปริมาณเอทานอลจากการหมักฟางข้าวของแบคทีเรียแต่ละชนิดในกระบวนการSSF ณ อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส และทำการเขย่าที่ 150 รอบต่อนาที

นำผลการทดลองจากตาราง 3.16 มาเปรียบเทียบปริมาณเอทานอลที่ได้จากแบคทีเรียแต่ละชนิด ดังรูป 3.22 พบว่าแบคทีเรีย *Bacillus sp. (2)* และ *Pumilus* เมื่อนำเข้าสู่กระบวนการหมักแบบต่อเนื่องแล้ว สามารถผลิตเอทานอลได้สูงและใกล้เคียงกัน คือ 0.79 %v/wt และ 0.76 %v/wt ตามลำดับ

ผลจากตารางที่ 3.15 – 3.16 ได้มาจากการทดลอง ณ อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส และทำการเขย่าที่ 150 รอบต่อนาที จากนั้นผู้วิจัยจึงทำการศึกษากระบวนการหมักฟางข้าว ณ อุณหภูมิห้อง โดยไม่ทำการเขย่า เพื่อเปรียบเทียบผลปริมาณเอทานอล ดังตาราง 3.17 ซึ่งแบคทีเรียที่ใช้ในการเปรียบเทียบคือ *Pumilus*

ตาราง 3.17 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเอทานอลของการหมักฟางข้าวของแบคทีเรีย *Pumilus* ในกระบวนการ SSF ณ อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส โดยไม่ทำการเขย่า

ปริมาณเอทานอล (%v/wt)	
ชนิดจุลินทรีย์	<i>Pumilus</i>
ระยะเวลาการหมัก (วัน)	
2	1.05
3	1.07
4	1.07
5	0.90



รูป 3.23 ปริมาณเอทานอลจากการหมักฟางข้าวของแบคทีเรีย *Pumilus* ในกระบวนการ SSF ณ อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส จากการเขย่า และไม่เขย่า

นำผลจากตาราง 3.16 มาเปรียบเทียบผลปริมาณเอทานอลที่ได้จากการหมักฟางข้าวโดยใช้แบคทีเรีย *Pumilus* แบบมีการเขย่าที่ 150 รอบต่อนาที และไม่มีมีการเขย่า ดังรูป 3.23 พบว่า การทดลองโดยทำการหมักแบบไม่เขย่าให้ปริมาณเอทานอลที่สูงกว่า จากนั้นผู้ทดลองจึงเลือกสภาวะการหมักแบบต่อเนื่องโดยไม่ทำการเขย่า

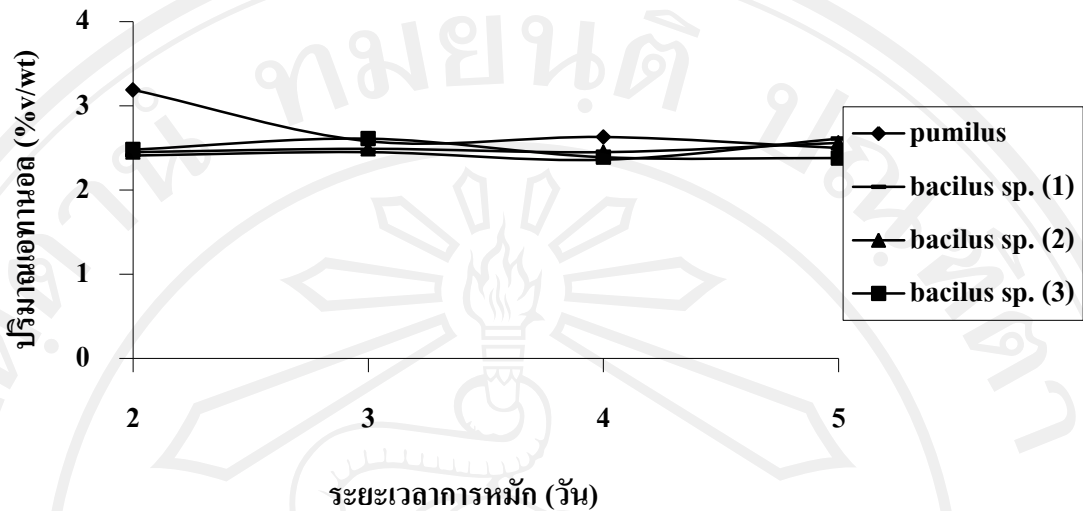
จากนั้นผู้วิจัยได้ทำการเพิ่มอุณหภูมิ⁽¹³⁾ ในการหมักฟางข้าวจากอุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส เป็น อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสเพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในกระบวนการหมักแบบต่อเนื่องต่อไป ซึ่งในกระบวนการหมักครั้งต่อไปจะทำการหมักโดยไม่เขย่า ดังรูป 3.24



รูป 3.24 การหมักฟางข้าวในกระบวนการหมักแบบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสโดยไม่ทำการเขย่า

ตาราง 3.18 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเอทานอลของการหมักฟางข้าวของแบคทีเรีย *Pumilus* ในกระบวนการ SSF ณ อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส โดยไม่ทำการเขย่า

ปริมาณเอทานอล (%v/wt)				
ชนิดจุลินทรีย์	<i>Pumilus</i>	<i>Bacillus sp.</i>	<i>Bacillus sp.</i>	<i>Bacillus sp.</i>
ระยะเวลาการหมัก (วัน)		(1)	(2)	(3)
2	3.19	2.41	2.45	2.48
3	2.58	2.45	2.49	2.61
4	2.63	2.36	2.45	2.39
5	2.50	2.61	2.56	2.38



รูป 3.25 ปริมาณเอทานอลจากการหมักฟางข้าวของแบคทีเรียแต่ละชนิดในกระบวนการSSF ณ อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส และไม่ทำการเขย่า

เมื่อทำการหมักฟางข้าวที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส โดยไม่ทำการเขย่า (ตาราง 3.18) พบว่าแบคทีเรียทุกชนิดสามารถผลิตเอทานอลจาก ฟางข้าวในกระบวนการหมักแบบต่อเนื่องได้สูงกว่า กระทำที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส (ตาราง 3.16)

จากผลการทดลอง พบว่า กระบวนการหมักแบบต่อเนื่องของฟางข้าวที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพแล้ว ควรกระทำที่ อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส และ ไม่ทำการเขย่า ดังรูป 3.25 แบคทีเรียที่สามารถผลิตเอทานอลได้สูงที่สุดจากกระบวนการนี้ คือ แบคทีเรีย *Pumilus* ซึ่งสามารถผลิตเอทานอลได้ปริมาณสูงที่สุด คือ 3.19 %v/wt

เมื่อพิจารณาเอทานอลที่ได้จากกระบวนการหมักฟางข้าวเทียบกับกระบวนการหมักสารละลายน้ำตาลกลูโคส พบว่า เมื่อทำการหมักสารละลายน้ำตาลกลูโคส เอทานอลที่ได้สูงที่สุดคือ 13.18%v/wt ซึ่งก็ยังมีปริมาณไม่สูงมากนัก เมื่อนำฟางข้าวมาเข้าสู่กระบวนการหมักได้ปริมาณเอทานอลสูงสุดที่ 3.19 %v/wt ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 24.20 ของการหมักน้ำตาลกลูโคส

ปริมาณเอทานอลที่ได้จากงานวิจัยนี้ยังมีปริมาณไม่สูงมากนักอาจเนื่องจากสภาพของกระบวนการหมัก เช่น ปริมาณความเข้มข้นของซับสเตรทไม่เหมาะสม⁽¹³⁾ และอุณหภูมิที่ใช้ยังไม่เหมาะสมกับการทำงานของจุลินทรีย์ เนื่องจากอุณหภูมิที่เหมาะสมระหว่างการย่อยเซลลูโลส คือ

โดยประมาณ 45 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิของการหมักเอทานอล (30 องศาเซลเซียส)⁽²⁾ ดังนั้น จึงควรหาอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการหมักแบบต่อเนื่องนี้ด้วย ซึ่งเมื่อพิจารณาที่ระบบการปรับสภาพ ระบบนี้น่าจะเหมาะสมในการปรับสภาพฟางข้าวเนื่องจากลดปริมาณลิกนินลงได้มาก และยังคงเหลือปริมาณเซลลูโลสไว้ในฟางข้าวได้ในปริมาณมากอีกด้วย ดังนั้น การที่งานวิจัยนี้มีปริมาณเอทานอลที่ต่ำอาจเนื่องมาจากสภาวะของกระบวนการหมักไม่เหมาะสม

นำผลการทดลองที่ได้นี้เปรียบเทียบกับปริมาณเอทานอลกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังตาราง 3.19

ตาราง 3.19 เปรียบเทียบปริมาณเอทานอลกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัย	ชนิดชีวมวล	การปรับสภาพ	ชนิดจุลินทรีย์	ปริมาณเอทานอล (mg/L)
Dawson และคณะ ⁽⁴³⁾	กากต้นอ้อย	0.8M H ₂ SO ₄ , 24 ชั่วโมง, อุณหภูมิห้อง	<i>Saccharomyces cerevisiae</i> 765	335.67
Ranjan และคณะ ⁽⁴⁴⁾	ฟางข้าว	ไอน้ำ 121°C, 30 นาที และ 1% H ₂ SO ₄ , 24 ชั่วโมง, 60°C	<i>Clostridium acetobutylicum</i> MTCC 481	200
Kuhad และคณะ ⁽⁴⁵⁾	ผลากรอง	3%H ₂ SO ₄ , 120°C, 45 นาที	<i>Trichoderma reesei</i> (ACTT 26921) และ β -glucosidase	17,700
El-Zawawy และคณะ ⁽⁴⁶⁾	ฟางข้าว	-	<i>Trichoderma reesei</i> (ACTT26921)	7,610
งานวิจัยนี้	ฟางข้าว	ไอน้ำ 2 ชั่วโมง, 1-2 บาร์, 100-130°C และ 2%NaOH, 75-90°C, 1 ชั่วโมง	<i>pumilus</i>	2,517*

*หมายเหตุ การคำนวณการเปลี่ยนหน่วยแสดงในภาคผนวก ซ

จากการพิจารณาปริมาณเอทานอลสูงสุดที่ได้จากกระบวนการหมักแบบต่อเนื่องในงานวิจัยนี้เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆพบว่า ยังมีปริมาณไม่สูงมากนัก จึงยังไม่เหมาะสมสำหรับการนำไปกลั่นแยก ซึ่งค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตเอทานอลจากฟางข้าวแสดงในภาคผนวก ฉ



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved